

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.452.6:621.89.084.6

- Юрій Коваленко провідний інженер-дослідник експериментально-випробувального комплексу, сектору міцності АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: turbina_vd@icloud.com, ORCID: 0009-0009-6572-1339
- Юрій Торба канд. техн. наук, заступник директора підприємства з наукової роботи, начальник експериментально-випробувального комплексу АТ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049
- Ольга Лазарева старший викладач кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: lazarevaolha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3417-6309
- Дмитро Павленко д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: dvp@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6376-2879

ВПЛИВ КУТІВ ПЕРЕМІЩЕННЯ БАНДАЖНОЇ ПОЛИЦІ НА ДЕМПФУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ЛОПАТКОВОГО ВІНЦЯ ТУРБІНИ

Мета роботи. Дослідження впливу співвідношення кутів переміщення Z-подібної бандажної полиці до кута нахилу робочої контактної поверхні на вібронапруженість робочих лопаток турбіни під час резонансних коливань за високочастотною формою.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження проведено на консольно закріпленій лопатці I ступеня турбіни вентилятора з використанням лабораторної установки, що включала звуковий генератор, підсилювач, п'єзовібратор, мікроскоп і п'єзоциуп. Вивчено дві форми високочастотних коливань (2810 Гц і 3550/3620 Гц), у межах яких здійснювалося вимірювання кутів переміщення восьми контрольних точок на бандажній полиці.

Отримані результати. Установлено, що ефективність демпфування залежить від співвідношення між напрямками переміщення бандажної полки та кутом нахилу контактної поверхні. При близьких значеннях цих параметрів забезпечується сталій контакт і ефективне демпфування навіть при коливаннях у протифазі. Зміна геометрії пера дозволила знизити інтенсивність вібрацій за другою формою коливань та покращити умови контакту.

Наукова новизна. Вперше показано, що напрямок переміщення бандажної полки є суттєвим фактором, що впливає на демпфувальні властивості лопаткового віня. Обґрунтовано доцільність геометричної оптимізації пера з метою стабілізації контактної взаємодії.

Практична цінність. Результати можуть бути використані під час доводки авіаційних турбін, особливо в умовах, коли неможливо застосувати демпфери або змінити осьовий розмір. Запропоновані рекомендації сприятимуть підвищенню ресурсу бандажного з'єднання без зміни зусиль притискання.

Ключові слова: демпфування, лопатка турбіни, бандажна полка, контактна поверхня, форма коливань, напрямок переміщення, авіаційний двигун.

Вступ

Зростання вимог до паливної економічності та експлуатаційної надійності авіаційних газотурбінних двигунів обумовлює необхідність підвищення ефективності роботи їхніх конструктивних елементів, зокрема турбінних лопаток. Одним із ключових чинників забезпечення довговічності лопаток є здатність конструкції до демпфування змінних (перемінних) напружень, що виникають у процесі роботи двигуна. Ефек-

тивне демпфування дає змогу зменшити рівень вібрацій, запобігти виходу на резонансні режими та уникнути втомного руйнування елементів лопаткового віня [1, 2].

Серед сучасних конструктивних рішень особливе місце посідають системи з бандажними з'єднаннями, які забезпечують пружний контакт між суміжними лопатками. Найбільш ефективною вважається така взаємодія між контактними поверхнями бандажних полиць, за якої досягається оптимальне значення сили

притискання. Проте можливість збільшення контактного тиску обмежується ризиком залипання, інтенсивного зносу або механічного пошкодження поверхонь полки, особливо під час нестационарних режимів роботи [3, 4].

Для підвищення ресурсу лопаток та ефективності роботи двигуна особливе значення має оптимізація параметрів кільцевого бандажного з'єднання, сформованого робочими лопатками за бандажними полками. У процесі експлуатації важливо також враховувати зміну геометрії з'єднання, зокрема співвідношення кута переміщення бандажної полки до кута нахилу робочої контактної поверхні, яке значною мірою впливає на демпфувальні властивості з'єднання. Дослідження цього впливу є актуальним і має важливе значення для підвищення надійності та довговічності авіаційних турбін.

Аналіз досліджень та публікацій

Забезпечення ефективного демпфування в лопаточних вінцях турбін є однією з найважливіших умов підвищення надійності та довговічності авіаційних газотурбінних двигунів. У класичних підходах до цієї проблеми головна увага зосереджувалася на використанні фрикційних демпферів. Так, у звіті [5] представлено результати досліджень ефективності таких демпферів для контролю низькочастотних коливань, де підтверджено їхню здатність знижувати рівень змінних напружень у критичних режимах роботи.

Разом із тим, удосконалення конструкцій лопаток відбувається шляхом впровадження геометрично складних елементів, зокрема Z-подібних бандажних полиць, описаних у технічному патенті [6]. Такі конструкції дають змогу поліпшити контактну взаємодію між суміжними лопатками, однак створюють нові виклики у прогнозуванні поведінки з'єднання в умовах вібраційного навантаження.

Пружна зв'язка між робочими лопатками також є важливим фактором впливу на загальну аероеластичну стабільність ротора. У дослідженні [7] на прикладі композитних лопаток було показано, що параметри пружного з'єднання істотно змінюють характер коливань, зокрема в умовах резонансних збурень.

Суттєву роль відіграє сила контактного тиску між бандажними полицями. Згідно з публікацією в журналі Applied Sciences [8], розподіл цієї сили впливає на стійкість до зношування та загальну ефективність демпфування. Однак, можливості її прямого збільшення обмежені через загрозу локального руйнування контактних поверхонь.

Ще одним важливим параметром є кут закрутки бандажної полиці, від якого залежить величина контактного моменту. У патенті [9] запропоновано пристрій для точної корекції цього кута, що є актуальним у процесі доведення та технічного обслуговування.

Огляд наявних джерел демпфування у турбомашинах [10] підтверджує комплексний характер цієї проблеми: до втрат енергії призводять не лише

фрикційні, а й матеріальні, аеродинамічні та геометричні фактори. Серед них важливе значення має величина притискання контактних поверхонь. Як показано в роботі [11], її оптимізація є ключовою умовою підвищення жорсткості й стабільності при вібраційних навантаженнях.

Детальний аналіз високочастотних форм коливань представлено в публікації [12], де розглянуто поведінку лопаток парових турбін при змінних режимах збудження. Особлива увага приділяється геометрії пера лопатки [13], яка визначає умови контактної взаємодії та впливає на амплітуду і напрямок переміщення бандажної полиці.

Однак, навіть за дотримання всіх конструктивних параметрів, основною проблемою залишається зношування контактних поверхонь, особливо в умовах інтенсивних коливань. Це питання досліджено в роботі [14], де описано механізми деградації поверхонь контакту та їх вплив на втрату демпфуючої здатності.

У зв'язку з цим усе більше уваги приділяється захисним покриттям, зокрема твердосплавним, на основі карбіду вольфраму, які наносяться методами детонаційного напилення. Такі підходи дозволяють підвищити зносостійкість без зміни геометрії контактних елементів [15]. Водночас правильне узгодження кута нахилу контактної поверхні з напрямками переміщення віброуючої бандажної полиці, як показано в роботі, є ключовим чинником забезпечення стабільного пружного контакту.

Таким чином, наявні дослідження охоплюють широкий спектр факторів, що впливають на демпфування, проте напрямок переміщення бандажної полиці у взаємозв'язку з геометрією робочої поверхні залишався малодослідженим. У цьому контексті запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цієї наукової прогалини, шляхом експериментального аналізу реальних напрямків переміщення контактних точок при різних формах коливань. Такий підхід дозволяє встановити нові критерії геометричного узгодження і покращити демпфуючі властивості без потреби у зміні сили притискання або введенні зовнішніх демпферів, що особливо важливо на етапі доведення двигуна.

Мета роботи

Дослідження впливу співвідношення кутів переміщення Z-подібної бандажної полиці до кута нахилу робочої контактної поверхні на вібронпруженість робочих лопаток турбіни під час резонансних коливань за високочастотною формою.

Матеріал і методика досліджень

Об'єктом дослідження була робоча лопатка 1-го ступеня турбіни вентилятора (ТВ), що має Z-подібну бандажну полицю. Дослідження спрямоване на пошук та аналіз додаткових факторів, здатних впливати на демпфування в робочих лопатках турбіни з Z-подібною бандажною полицею лопаткового вінця.

Відомо, що одним із суттєвих факторів, що впливають на демпфування, є пружний зв'язок робочих лопаток по бандажних полицях. Цей зв'язок виникає завдяки закрутці пера на кут φ . При цьому на бандажні полиці діє крутний момент

$$M = G \cdot \varphi, \quad (1)$$

де G — жорсткість лопатки на кручення пера.

Практика показала, що основним параметром, який характеризує рівень кільцевого бандажного зв'язку, є сила N контактної тиску між полицями:

$$N = M / t \cos \beta = G \varphi / t \cos \beta, \quad (2)$$

де t — відстань між бандажними полицями лопаток;
 β — кут між площиною обертання та поверхнею контакту полиці.

На рисунку 1 показано сили, що діють на бандажну полицю в її площині під час роботи.

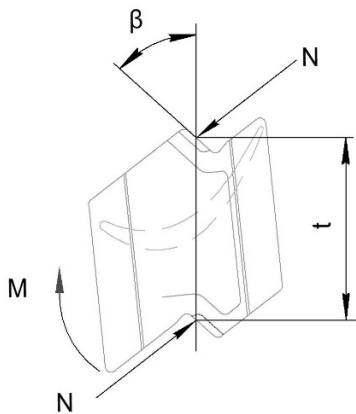


Рисунок 1. Схема дії сил на бандажну полицю під час роботи

Сила N може зростати при збільшенні кута β або крутного моменту M . Слід зазначити, що кут β можна збільшувати до певних меж для уникнення заклинювання та поломки полиць на нестаціонарних режимах роботи.

У досліджуваному бандажному зв'язку, на відміну від робочих лопаток із плоскими бандажними полицями, при роботі двигуна перо лопатки розкручується в полі відцентрових сил таким чином, що збільшує дію монтажного кута закрутки.

Максимальне демпфірування змінних напружень досягається за допомогою оптимальної величини притиснення робочих поверхонь контактних полиць, що унеможливує їх співудар і зменшує знос поверхонь контакту [16].

Згідно з радіальною нерівномірністю епюри температурного поля в умовах роботи на двигуні, макси-

мальні значення температур знаходяться у верхній третині пера під бандажною полицею. З урахуванням зростання напрацювання (щонайменше 10 тисяч годин) за призначений ресурс, неминуче відбувається накопичення мікроскопічних деформацій, пов'язаних із повзучістю матеріалу під час дії високих температур. Через це лопатка необоротно деформується і притискна сила тиску між полицями знижується, що призводить до вироблення контактних поверхонь і зростання вібранапруженості в робочих лопатках під час резонансних коливань, при цьому рівні можуть бути досить високими.

Для зниження рівня вібранапруженості досліджували можливість їхнього демпфірування за допомогою коригування кутів переміщення бандажної полиці до кута нахилу контактної поверхні, домагаючись мінімальної різниці між ними.

Для дослідження було висунуто гіпотезу, що одним із додаткових факторів, які впливають на демпфування, може бути напрямок переміщення бандажної полиці відносно кута нахилу робочої контактної поверхні.

Експериментальна частина дослідження проводилась у лабораторних умовах на консольно закріпленій лопатці 1-го ступеня ТВ. Для цього була зібрана схема, що представлена на рис. 2 та складалася з: звукового генератора, підсилювача, п'єзовібратора, п'єзошупа та мікроскопа.



Рисунок 2. Схема для дослідження кутів переміщення бандажної полиці

Робоча лопатка встановлювалася в захват і затискала в ярі зі штоком необхідним зусиллям, яке забезпечувало хорошу добротність лопатки, не пошкоджуючи при цьому її замкову частину. У такому вигляді ярмо зі штоком монтувалось на п'єзовібратор. На бандажній полиці для визначення кутів переміщення через мікроскоп відзначалися вісім точок, кути визначалися відносно осі горизонталі.

Дослідження лопатки проводилось за двома високочастотними формами з частотами $f = 2810$ Гц та $f = 3550$ Гц відповідно. Робоча лопатка вводилась у резо-

нанс, при цьому спочатку визначалася форма її коливань, а потім кути переміщення бандажної полиці через мікроскоп за досліджуваною формою.

Результати досліджень

За результатами проведених експериментальних досліджень першої форми коливань із частотою $f = 2810$ Гц встановлено, що кути переміщення точок 2 і 3 дуже близькі до кута нахилу робочої контактної поверхні, різниця становить лише 9° і 2° відповідно. Така мінімальна різниця кутів переміщення, що виникає завдяки крутильній складовій коливань, забезпечує постійне тертя ковзання та ефективне демпфування по контактних поверхнях навіть за умов зниження тиску та коливань сусідніх лопаток у протифазі. Водночас різниця між кутами переміщення точок 6 і 7 є значно більшою і становить 43° та 33° відповідно.

Досліджувана форма є досить інтенсивною, однак під час тензометричних вимірювань на двигуні вона не проявлялася; максимальні рівні вібронапруженості робочих лопаток зафіксовано для другої досліджуваної форми.

При дослідженні другої форми коливань із частотою $f = 3550$ Гц виявлено, що кути переміщення точок 2, 3 та 6, 7 близькі між собою, але мають значну різницю з кутом нахилу контактної поверхні: 51° , 53° та 47° , 43° відповідно. Така значна різниця кутів переміщення, що виникає завдяки згинальній складовій, забезпечує тертя кочення по контактних поверхнях при оптимальному тиску та коливаннях сусідніх лопаток у протифазі.

Зважаючи на те, що зі зростанням напруцювання величина притискання робочих поверхонь контактних полиць знижується, це може призвести до активного зносу поверхонь контакту, втрати демпфування та співудару полиць.

Отже, необхідно змінити кути переміщення, щоб забезпечити постійний контакт і тертя ковзання між поверхнями контактних полок навіть за умов зниження притискної сили в процесі напруцювання.

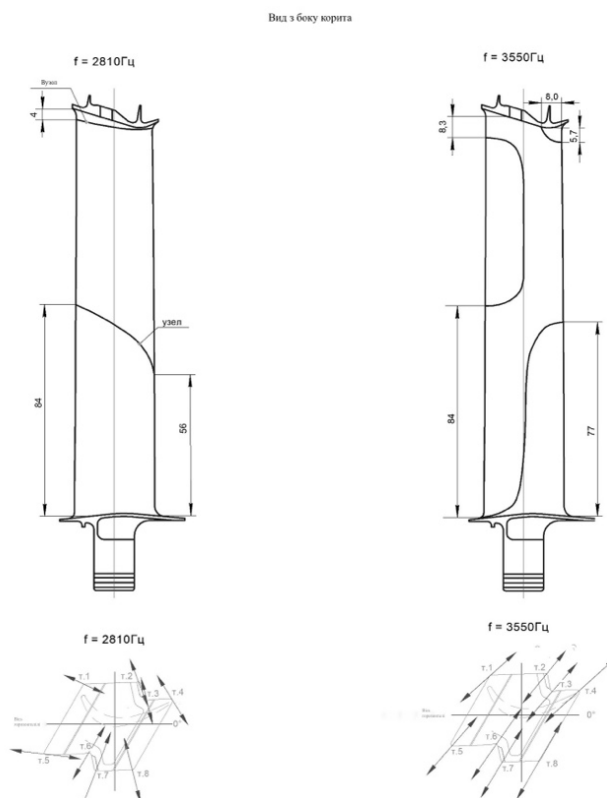
Переміщення всіх восьми точок для кожної з досліджуваних форм представлені на рис. 3.

Значення кутів переміщення точок бандажної полки для кожної з форм наведені в таблиці 1.

Для зниження рівня змінних напружень за другою досліджуваною формою було впроваджено конструкторський захід, пов'язаний зі зміною геометрії пера лопатки. Лабораторні дослідження показали, що така зміна геометрії суттєво не вплинула на форми коливань, однак знизила інтенсивність першої досліджуваної форми та змінила частоту другої. Несуттєва зміна частоти (+2 %) за другою досліджуваною формою пов'язана з перестановкою лопатки.

Після впровадження конструкторських змін за першою формою коливань із частотою $f = 2810$ Гц встановлено, що різниця між кутами переміщення точок 2 і 3 стосовно кута нахилу робочої контактної поверхні становить 24° і 14° відповідно, що дещо вище

порівняно з попередніми значеннями. Водночас різниця між кутами переміщення точок 6 і 7 становить 22° і 8° відповідно, що істотно нижче за попередні показники. Отримані зміни значень кутів переміщення забезпечують постійне тертя ковзання та ефективність демпфування по контактних поверхнях, навіть при зниженні тиску та коливаннях сусідніх лопаток у протифазі.



та забезпечити тертя ковзання поверхонь контактних полиць навіть при зниженні сили тиску та коливаннях сусідніх лопаток у протифазі зі зростанням напруження.

Результати тензометрування підтверджують поліпшення демпфуючої здатності лопаткового вінця завдяки коригуванню співвідношення кутів переміщення бандажної полиці до кута нахилу контактної поверхні, досягаючи мінімальної різниці між ними. За отриманими даними, при резонансних коливаннях за другою досліджуваною формою вдалося зменшити вібронапруженість робочих лопаток на 23,5 %.

Переміщення всіх восьми точок представлені на рис. 4.

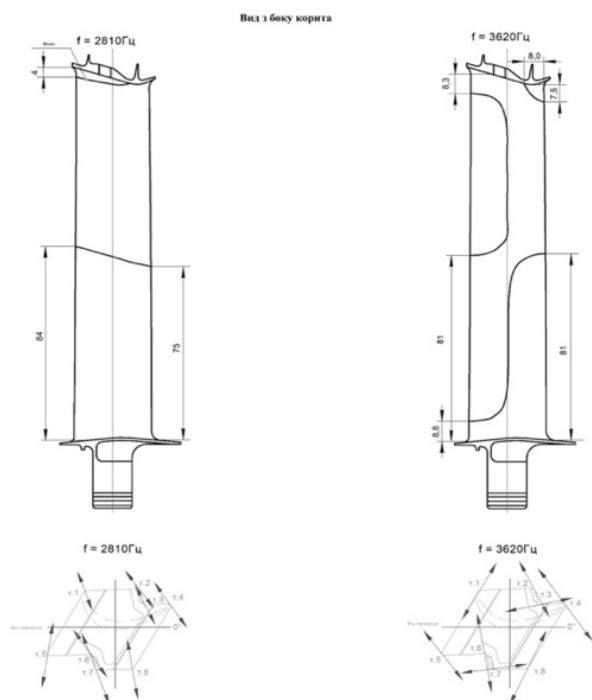


Рисунок 4. Форми коливань і кути переміщення бандажної полиці

Значення кутів переміщення точок бандажної полки для кожної з досліджуваних форм після доопрацювання наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Кути переміщення точок на бандажній полиці за досліджуваними формами після доопрацювання

Частота коливань, Гц	Кути переміщення точок відносно горизонталі, град							Кут нахилу контактної поверхні
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6	т.7	
2810	105°	126°	116°	125°	81°	124°	110°	100°
3620	60°	117°	12°	125°	127°	100°	8°	65°

Розглянувши дві високочастотні форми коливань та чотири варіанти переміщення бандажної полиці, встановлено:

- вплив на демпфуючу здатність лопаткового вінця турбін співвідношень кутів переміщення бандажної полиці до кута нахилу робочої контактної поверхні;
- зміну кутів переміщення бандажної полиці стосовно кута нахилу робочої поверхні за рахунок впровадженого конструкторського заходу;
- зниження рівня вібронапруженості робочих лопаток за другою досліджуваною формою на 23,5 %.

Водночас при різниці кутів переміщення 9° і менше відбувається неминучий інтенсивний знос контактних поверхонь, що зумовлює доцільність застосування твердосплавних покриттів на основі карбіду вольфраму з нікелем і кобальтом методом детонаційного напилення.

З урахуванням зростання напруження та можливого підвищення рівня вібронапруженості робочих лопаток у резонансних коливаннях, яке виникає внаслідок зниження сили контактного тиску між полками та збільшення зношення контактних поверхонь, використання результатів проведених досліджень набуває особливої актуальності у випадках, коли неможливо застосувати демпфери, змінити конструкцію соплового апарату або осьового розміру між лопатками соплового апарату та робочими лопатками у колесі.

Обговорення

Результати дослідження впливу співвідношення кутів переміщення бандажної полки до кута нахилу контактної поверхні на демпфувальну здатність лопаток першої ступені турбіни вентилятора підтвердили, що конструктивні особливості бандажного з'єднання мають велике значення для ефективного зниження рівня змінних напружень.

Було встановлено, що мінімальна різниця між кутами переміщення окремих точок бандажної полки та кутом нахилу контактної поверхні забезпечує сталість контактної взаємодії й наявність тертя ковзання, навіть при зниженні сили притискання в процесі тривалої експлуатації. Зокрема, при коливаннях на частоті 2810 Гц за першою формою, найменша різниця кутів (2° і 9° для точок 2 та 3) сприяла ефективному демпфуванню та зниженню рівня вібронавантаження. У той же час значна різниця кутів переміщення в інших точках зумовлювала нестабільність контакту й менш ефективне гасіння коливань.

Після впровадження конструкторських змін у геометрію пера лопатки були досягнуті зміни кутів переміщення: зменшено різницю у точках, де раніше спостерігалася значна різниця. Це дало змогу підвищити демпфувальну здатність та знизити рівень вібронавантаження лопаток при коливаннях другої форми на частоті 3620 Гц — на 23,5 %.

Значну роль у зміні силового впливу та стабільності контакту відіграє кут β – кут між площиною

обертання та контактної поверхнею полки, який також підлягає оптимізації. Крім того, необхідно врахувати вплив температурного поля та повзучості матеріалу в умовах тривалої експлуатації, що поступово знижує силу притискання й ефективність бандажного з'єднання. За таких умов мінімізація різниці між кутами переміщення й кутом нахилу контактної поверхні виступає важливим фактором у забезпеченні стабільного демпфування.

Отже, на підставі аналізу двох форм високочастотних коливань і чотирьох варіантів переміщення бандажної полки підтверджено доцільність та ефективність корекції геометрії пера лопатки для покращення умов роботи контактних поверхонь та підвищення ресурсу лопаточного вінця. Додатковим заходом для зниження зношування контактних поверхонь може стати нанесення твердосплавних покриттів на основі карбіду вольфраму з нікелем та кобальтом за допомогою детонаційного напилення.

Висновки

Встановлено вплив співвідношення кутів переміщення Z-подібної бандажної полки до кута нахилу контактної поверхні на демпфувальну здатність лопаточного вінця турбіни.

Для зниження рівня вібронавантаження при резонансних коливаннях необхідно мінімізувати різницю між кутами переміщення бандажної полки та кутом нахилу контактної поверхні по відповідній формі коливань.

Мінімізація цієї різниці може бути досягнута за рахунок корекції геометрії пера лопатки, конструктивної доопрацювання бандажної полки або зміни кута β .

Завдяки корекції кутів переміщення до кута нахилу контактної поверхні вдалося знизити рівень вібронавантаження лопаток по високочастотній формі коливань на 23,5 %.

Для захисту контактних поверхонь від інтенсивного зношування при співвідношенні кутів 9° і менше рекомендується наносити на них твердосплавні покриття на основі карбіду вольфраму з нікелем і кобальтом методом детонаційного напилення.

Результати дослідження є особливо актуальними у випадках, коли неможливо застосувати демпфери, змінити конструкцію соплового апарату або осьового розміру між лопатками соплового апарату та робочими лопатками у колесі.

Подяки

Автори висловлюють щирі подяки Білоус Ользі Вікторівні, інженеру-досліднику I категорії АТ «Івченко - Прогрес», за професійну допомогу, технічну підтримку та активну участь у проведенні лабораторних досліджень, що суттєво сприяли досягненню результатів цієї наукової роботи.

Список літератури

1. Vyas N. S. Fatigue life estimation procedure for a turbine blade under transient loads / Vyas N. S., Rao J. S. // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. –

1994. – Vol. 116, No. 1. – P. 198–206. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2906792>

2. Муравченко Ф. М. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности авиадвигателей / Ф. М. Муравченко // *Проблемы прочности*. – 2008. – № 5. – С. 7–14.

3. Колебания бандажированного рабочего колеса ГТД / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9. – С. 87–90.

4. Меркулов В. М. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин / В. М. Меркулов, Ф. Д. Ильющенко // *Вестник двигателестроения*. – 2005. – №2. – С. 114–117.

5. NASA Technical Reports. Friction damping of turbine blades: control of low-frequency vibrations. – NASA, 1985. – 12 с. – (NASA Technical Paper 2482). – URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19850018575/downloads/19850018575.pdf>

6. US Patent No. 7887295 B2. Turbine blade platform with Z-shaped shroud. – United States Patent and Trademark Office, 2011. – 10 p. – URL: <https://patents.google.com/patent/US7887295B2/en>

7. NASA Technical Reports. Aeroelastic Stability of Composite Rotor Blades with Elastic Coupling. – NASA, 1997. – (NASA TM-113226). – URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970016974>.

8. Gastaldi C. Experimental verification of the dynamic model of turbine blades coupled by a sealing strip/ . Gastaldi C., Berruti T. M. // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, No. 11. – P. 2174. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app8112174>.

9. European Patent EP2110512B1. Tool for correcting blade twist angle URL: <https://patents.google.com/patent/EP2110512B1/en>

10. Moneta G. Insight into damping sources in turbines / Moneta G. // *Fatigue of Aircraft Structures*. – 2022. – Vol. 2022, No. 14. – P. 69–82. – DOI: <https://doi.org/10.2478/fas-2022-0006>

11. Cioată V. G. The optimization of the position and the magnitude of the clamping forces in machining fixtures / Cioată V. G., Kiss I., Alexa V., Rațiu S. A. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 200, No. 1. – P. 012015. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/200/1/012015>.

12. Yang B. D. Stick-slip-separation analysis and non-linear stiffness and damping characterization of friction contacts having variable normal load / Yang B. D., Chu M. L., Menq C. H. // *Journal of Sound and Vibration*. – 2018. – Vol. 210, No. 4. – P. 461–481. – DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1305>

13. Petrov E. P. Advanced modeling of underplatform friction dampers for analysis of bladed disk vibration / Petrov E. P., Ewins D. J. // *Journal of Turbomachinery*. 2019. Vol. 129, No. 1. P. 143–150. DOI: 10.1115/1.2372775.

14. Shevtsov I. Wear mechanism of turbine blade contact surfaces under dynamic loading / Shevtsov I., Pavlenko D. // *Wear*. – 2015. – Vol. 332–333. – P. 1094–1102. – DOI: 10.1016/j.wear.2015.02.043.

15. Защитные покрытия : учеб. пособие / Лобанов М. Л., Кардолина Н. И., Россина Н. Г., Юровских А. С. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с. – ISBN 978-5-7996-1101-9

16. Кривошей В. Я. О влиянии конструктивных факторов на долговечность бандажных полок рабочих лопаток турбин / В. Я. Кривошей // Проблемы прочности. – 1987. – № 8. – С. 67–70.

Одержано 29.05.2025

INFLUENCE OF SHROUD PLATFORM DISPLACEMENT ANGLES ON THE DAMPING CAPACITY OF A TURBINE BLADE RING

Yurii Kovalenko Leading Research Engineer, Strength Analysis Section, Experimental Testing Complex, JSC Ivchenko-Progress, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: turbina_vd@icloud.com, ORCID: 0009-0009-6572-1339

Yuriy Torba Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Research, Head of the Experimental Testing Complex, JSC Ivchenko-Progress, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: torba.yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049

Olha Lazarieva Senior Teacher the Department of Aircraft Engine Technology, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: lazarevaolha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3417-6309

Dmytro Pavlenko Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Aircraft Engine Technology, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6376-2879

Purpose. Investigation of the influence of the ratio between the displacement angles of the Z-shaped shroud shelf and the inclination angle of the working contact surface on the vibration stress of turbine rotor blades under resonant oscillations in high-frequency mode.

Research methods. Experimental investigations were carried out on a cantilever-mounted first-stage fan turbine blade using a laboratory setup comprising a signal generator, amplifier, piezovibrator, microscope, and piezoprobe. Two high-frequency vibration modes (2810 Hz and 3550/3620 Hz) were examined. The angular displacements of eight control points on the shroud platform were measured using a microscope.

Results. It was established that the damping efficiency depends on the relationship between the displacement direction of the shroud platform and the angle of the contact surface. When these directions are closely aligned, stable contact and effective damping are maintained even during out-of-phase blade vibrations. Modification of the airfoil geometry reduced the intensity of vibrations in the second vibration mode and improved contact conditions.

Scientific novelty. For the first time, it has been demonstrated that the direction of shroud platform displacement significantly affects the damping performance of the blade ring, regardless of the contact pressure. The feasibility of optimizing the blade geometry to stabilize contact interaction is substantiated.

Practical value. The findings can be applied in the tuning of aircraft turbines, especially when the use of dampers or axial dimension adjustments is not possible. The proposed recommendations contribute to increased service life of the shroud connection without altering the contact force.

Key words: damping, turbine blade, shroud platform, contact surface, vibration mode, displacement direction, aircraft engine.

References

1. Vyas, N. S., & Rao, J. S. (1994). Fatigue life estimation procedure for a turbine blade under transient loads. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 116(1), 198–206. <https://doi.org/10.1115/1.2906792>
2. Muravchenko, F. M. (2008). Aktual'nye problemy dinamiki, prochnosti i nadezhnosti aviadvigateley. *Problemy prochnosti*, (5), 7–14.
3. Vorob'ev, Y. S., Dyakonenko, K. Y., Romanenko, V. N., & others. (2006). Kolebaniya bandazhirovannogo rabochego kola GTD. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, (9), 87–90.

4. Merkulov, V. M., & Ilyushchenko, F. D. (2005). O vybere sposoba bandazhirovaniya rabochikh lopatok turbin. *Vestnik dvigatelestroeniya*, (2), 114–117.

5. National Aeronautics and Space Administration. (1985). Friction damping of turbine blades: Control of low-frequency vibrations (NASA Technical Paper 2482). <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19850018575/downloads/19850018575.pdf>

6. United States Patent and Trademark Office. (2011). Turbine blade platform with Z-shaped shroud (US Patent No. 7887295 B2). <https://patents.google.com/patent/US7887295B2/en>

7. NASA. (1997). Aeroelastic stability of composite rotor blades with elastic coupling (NASA Technical Memorandum No. 113226). NASA Technical Reports. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970016974>
8. Gastaldi, C., & Berruti, T. M. (2018). Experimental verification of the dynamic model of turbine blades coupled by a sealing strip. *Applied Sciences*, 8(11), 2174. <https://doi.org/10.3390/app8112174>
9. European Patent Office. (n.d.). Tool for correcting blade twist angle (European Patent EP2110512B1). <https://patents.google.com/patent/EP2110512B1/en>
10. Moneta, G. (2022). Insight into damping sources in turbines. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2022(14), 69–82. <https://doi.org/10.2478/fas-2022-0006>
11. Cioată, V. G., Kiss, I., Alexa, V., & Rațiu, S. A. (2017). The optimization of the position and the magnitude of the clamping forces in machining fixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 200(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/200/1/012015>
12. Yang, B. D., Chu, M. L., & Menq, C. H. (2018). Stick-slip-separation analysis and non-linear stiffness and damping characterization of friction contacts having variable normal load. *Journal of Sound and Vibration*, 210(4), 461–481. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1305>
13. Petrov, E. P., & Ewins, D. J. (2019). Advanced modeling of underplatform friction dampers for analysis of bladed disk vibration. *Journal of Turbomachinery*, 129(1), 143–150. <https://doi.org/10.1115/1.2372775>
14. Shevtsov, I., & Pavlenko, D. (2015). Wear mechanism of turbine blade contact surfaces under dynamic loading. *Wear*, 332–333, 1094–1102. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.043>
15. Lobanov, M. L., Kardonina, N. I., Rossina, N. G., & Yurovskikh, A. S. (2014). *Zashchitnye pokrytiya [Protective coatings]*. Yekaterinburg: Ural University Publishing House.
16. Krivoshey, V. Ya. (1987). O vliyani kon- struktivnykh faktorov na dolgovechnost' bandazhnykh po- lok rabochikh lopatok turbin. *Problemy prochnosti*, (8), 67–70.